

CURVAS DE TRANSFERENCIA DE CARGA HORIZONTAL *p-y* PARA SUELOS LIMOSOS LOÉSSICOS

PEDRO A. ARRÚA*
GONZALO M. AIASSA**

RESUMEN

Las fundaciones profundas excavadas pueden estar sometidas a solicitaciones horizontales. En esta condición, el análisis de comportamiento resulta complejo debido a la tridimensionalidad del problema. Sin embargo, los modelos empleados en la práctica ingenieril frecuentemente reducen el análisis a dos dimensiones. En este trabajo se modifica el procedimiento propuesto por Matlock y Reese (1960) para su aplicabilidad a suelos loéssicos. Se desarrolla una alternativa para establecer la variación del módulo de reacción horizontal con la profundidad para suelos de característica intermedia entre arenas y arcillas, como son los suelos limosos. Se establece una analogía entre la expansión de una cavidad y la deflexión de un pilote sometido a cargas laterales para la construcción de curvas de transferencia de carga horizontal *p-y* en condición de humedad natural y saturado. Finalmente, se analizan dos casos de estudio, donde se evalúa computacionalmente la respuesta de un pilote instalado en un estrato de limo loéssico que sufre humedecimiento localizado. Los resultados muestran la importancia de considerar el incremento accidental de humedad en el perfil cuando los pilotes se encuentran instalados en suelos inestables.

PALABRAS CLAVE: curvas *p-y*; expansión de cavidad; suelo colapsable; interacción suelo-pilote.

HORIZONTAL LOAD TRANSFERENCE *p-y* CURVE FOR SILTY LOESS SOILS

ABSTRACT

Drilled deep foundations may be subjected to horizontal loads. Under this condition, the behavior analysis is complicated due to the tridimensionality of the problem. However, the models used in engineering

* Ingeniero Civil; Especialista en Docencia Universitaria; Magíster y Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Profesor Adjunto Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Departamento de Ingeniería Civil. Laboratorio de Investigación en Geocaracterización de Sitios. parrua@cbasicas.frc.utn.edu.ar

** Ingeniero Civil; Especialista en Docencia Universitaria; Magíster y Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Profesor Adjunto Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Departamento de Ingeniería Civil. Laboratorio de Investigación en Geoestructuras. gaiassa@scdt.frc.utn.edu.ar

practice often reduce the analysis to two dimensions. In this paper the procedure proposed by Matlock and Reese (1960) is modified for its applicability to loess soils. An alternative to establish the variation of the horizontal subgrade reaction module as a function of depth, for soils with intermediate characteristics between sands and clays, such as silty soils, is developed. An analogy between the cavity expansion and deflection of a pile subjected to lateral loads is established for construction of horizontal charge transfer p - y curves under natural humidity and saturated conditions. Finally, two study cases are analyzed, where the response of pile installed on loess silty soil layer suffering localized wetting is computationally evaluated. Results show the importance of considering the accidental wetting increase, when the piles are installed in unstable soils.

KEY WORDS: p - y curve; cavity expansion; collapsible soil; pile-soil interaction.

CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA HORIZONTAL p - y PARA SOLOS LIMOSOS LOÉSSICOS

RESUMO

As fundações profundas escavadas podem estar submetidas a solicitações horizontais. Sob esta condição, a análise de comportamento resulta complexa devido à tridimensionalidade do problema. No entanto, os modelos empregados na prática ingenieril freqüentemente reduzem a análise a duas dimensões. Neste trabalho se modifica o procedimento proposto por Matlock e Reese (1960) para sua aplicabilidade a solos loéssicos. Desenvolve-se uma alternativa para estabelecer a variação do módulo de reação horizontal em profundidade para solos de característica intermédia entre areias e argilas como são os solos limosos. Estabelece-se uma analogia entre a expansão de uma cavidade e a deflexão de um pilotis submetido a cargas laterais para a construção de curvas de transferência de carga horizontal p - y em condição de umidade natural e saturado. Finalmente, se analisam dois casos de estudo, onde se avalia computacionalmente a resposta de um pilotis instalado em uma camada de limo loéssico que sofre humedecimento localizado. Os resultados mostram a importância de considerar o aumento accidental de umidade no perfil quando os pilotis se encontram instalados em solos de características instáveis.

PALAVRAS-CÓDIGO: curvas p - y ; expansão de cavidade; solo colapsável; interação solo-pilotis.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de pilotes sometidos a cargas laterales (figura 1), usualmente se analiza por medio de ecuaciones diferenciales que consideran el pilote como viga lineal elástica (ecuación (1)). El primer término de la ecuación representa el comportamiento en flexión; el segundo, la carga axial junto a su efecto ante el desplazamiento horizontal, y el tercer término corresponde a la reacción del suelo. Esta ecuación no posee solución cerrada y su resolución requiere el uso de métodos numéricos.

En general, se acepta que el término de reacción del suelo es de comportamiento no lineal

y variable en profundidad. Esto aumenta la complejidad de la solución, a menos que se lo analice bidimensionalmente y de manera discreta, con lo cual se obtiene la respuesta del comportamiento del suelo para cada profundidad (reacción de suelo p como función de la deflexión y). Debido a que el desplazamiento debe ser conocido antes de evaluar la presión de suelo, se requiere un proceso iterativo en el cual es necesario definir paso a paso el módulo de elasticidad tangente del suelo. Numerosos autores presentan la diferencia entre el comportamiento de pilotes instalados en suelos granulares de los instalados en suelos arcillosos, proponiendo en cada caso un proceso de análisis particular (Bransby, 1999).

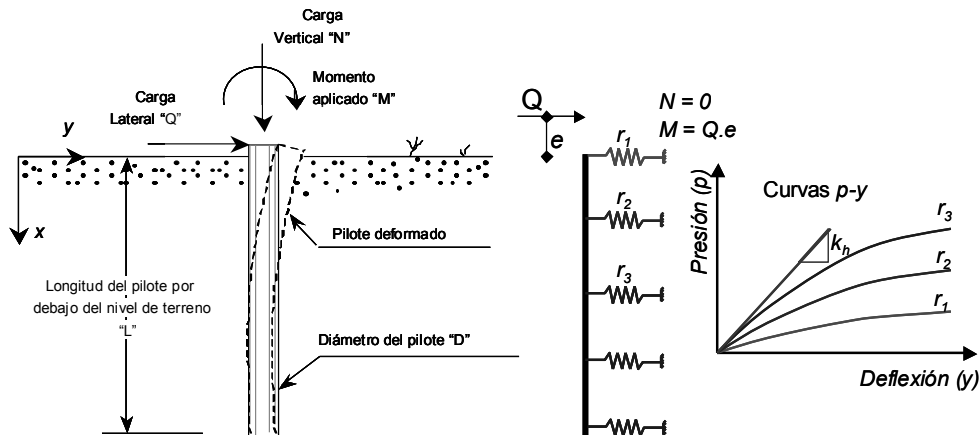


Figura 1. Pilote sometido a carga vertical, lateral y momento con cabezal libre

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + \frac{d}{dx} \left(N(x) \frac{dy}{dx} \right) - p(x, y) = 0 \quad (1)$$

Matlock y Reese (1960) calculan la deflexión, momento flector y esfuerzo de corte a lo largo del pilote mediante la solución de la ecuación:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{k_h y}{EI} = 0 \quad (2)$$

Donde y = deflexión, k_h = módulo de reacción horizontal del suelo, I = momento de inercia de la sección del pilote y E = módulo de elasticidad del material que constituye el pilote.

Para pilotes flexibles, los autores introducen un factor de rigidez relativa suelo-pilote T empleado para calcular las deflexiones en suelos arenosos o arcillosos a partir de ecuaciones que incluyen coeficientes adimensionales. Para carga lateral y momento aplicado en la cabeza del pilote, la ecuación (2) se escribe respectivamente como:

$$\frac{d^4 A}{dz^4} + \phi_{(z)} A = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^4 B}{dz^4} + \phi_{(z)} B = 0 \quad (4)$$

Donde z = variable intermedia, $\phi(z)$ = función que depende del tipo de suelo, A y B son coeficientes adimensionales. Para la deflexión, el momento flector, el esfuerzo de corte y la presión lateral del suelo a lo largo del pilote la formulación permite establecer los coeficientes $A_y, B_y, A_s, B_s, A_m, B_m, A_v, B_v, A_p, B_p$, empleados para el cálculo y obtenidos con la solución de las ecuaciones (3) y (4).

2. PILOTES FLEXIBLES INSTALADOS EN SUELOS LIMOSOS

El sistema suelo-pilote en limos responde como una situación intermedia a los casos considerados como extremos para arcilla y arena (Arrúa y Aiassa, 2008). Algunos de los procedimientos para el cálculo de pilotes a cargas horizontales pueden consistir en:

- 1) Modificación de metodología de cálculo para adaptar a la condición del suelo
- 2) Construcción de curvas p - y

En el primer caso es necesario seleccionar un método que posea flexibilidad suficiente en su formulación. Para las opciones 2), se requieren ensayos *in situ* que soliciten la masa de suelo en dirección horizontal o el empleo de ensayos de carga horizontal a gran escala para realizar análisis inversos mediante métodos de predicción, ajustando los resultados del método a los obtenidos en campo o ensayos de laboratorio que apliquen cargas en dirección horizontal y que puedan relacionarse con el sistema físico (suelo-pilote). En los casos presentados es necesario establecer la variación del módulo de reacción horizontal en profundidad, para definir la respuesta de las curvas *p-y* con las que se calcula el comportamiento del pilote.

3. MÓDULO DE REACCIÓN HORIZONTAL k_h EN PROFUNDIDAD

Para el cómputo de deflexiones en pilotes sometidos a sollicitaciones horizontales, se requiere una clasificación de comportamiento global (pilote rígido o flexible) (Prakash y Sharma, 1990). Para esto se emplea un coeficiente T obtenido mediante la relación entre la rigidez flexural del pilote y la rigidez del suelo (ecuación (5)). La rigidez a deformaciones transversales del pilote se obtiene mediante el producto entre el módulo de elasticidad y el momento de inercia, EI , mientras que la rigidez del suelo es un parámetro geotécnico caracterizado por el módulo de elasticidad del suelo E_s o el módulo transversal de corte G_s .

$$T = \sqrt[4]{\frac{EI}{E_s}} \quad (5)$$

En el rango elástico (pequeñas deformaciones) es suficiente conocer E_s y G_s , para los cuales, por lo general, no se considera su variación en profundidad. Cuando se pretende evaluar el comportamiento del pilote en el rango no lineal, estos parámetros son insuficientes y se recurre al módulo de reacción lateral k_h definido como el cociente entre la presión

desarrollada por el suelo p ante la aplicación de la carga y la deflexión producida y (Shen y Teh, 1990). Las sollicitaciones aplicadas sobre la cabeza del pilote provocan desplazamientos laterales que disminuyen en profundidad, debido a la transferencia de carga al suelo. Este escenario se representa por curvas *p-y* (figura 1). Por otro lado, el suelo puede tener diferente rigidez en profundidad. Por ejemplo, se acepta que los suelos granulares poseen un incremento del módulo de reacción horizontal proporcional a la profundidad, caracterizado por el coeficiente de reacción horizontal n_h . En este caso la relación entre rigidez suelo-pilote se establece como:

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \quad (6)$$

En suelos netamente cohesivos el módulo de reacción horizontal se suele considerar constante en profundidad y , por lo tanto, no existe relación funcional entre el módulo k_h y la profundidad x . De este modo $E_s = k_h$ en la ecuación (5).

En suelos limosos la determinación de la ley de variación de k_h está ligada a los parámetros resistentes, los límites de plasticidad y condiciones generales del suelo, como el contenido de humedad, el peso unitario seco y los niveles de cementación.

Para el uso del método de Matlock y Reese es necesario establecer variaciones del módulo de reacción horizontal en profundidad que permitan realizar un análisis dimensional cerrado. De esta manera, las curvas de carga-deflexión pueden obtenerse considerando variaciones del módulo de reacción lateral k_h en profundidad intermedias al comportamiento constante y lineal utilizado generalmente para arcillas o arenas en la formulación de curvas *p-y*. En este trabajo se propone una ecuación del tipo:

$$k_h = m_h \left(\frac{x}{D} \right)^n \quad (7)$$

Donde m_h = parámetro de crecimiento de la función $k_{h(x)}$, n = coeficiente de forma que establece



las características de variación en profundidad de la función para $k_{h(x)}$ entre 0 y 1 dependiendo de las características del suelo, x = profundidad, D =diámetro del pilote. Para esta condición, la relación de rigidez flexural para el sistema suelo-pilote resulta:

$$T = \sqrt[n+4]{\frac{EI \cdot D^n}{m_h}} \quad (8)$$

Para $n = 0$ la ecuación corresponde a suelos cohesivos:

$$n = 0 \rightarrow T = \sqrt[0+4]{\frac{EI \cdot D^0}{k_h \left(\frac{D}{x}\right)^0}} = \sqrt[4]{\frac{EI}{k_h}} \quad (9)$$

Mientras que para $n = 1$ corresponde a suelos granulares:

$$n = 1 \rightarrow T = \sqrt[1+4]{\frac{EI \cdot D^1}{k_h \left(\frac{D^1}{x^1}\right)}} = \sqrt[5]{\frac{EI}{k_h}} = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \quad (10)$$

Si n es nulo, el módulo de reacción lateral permanece constante en profundidad k_h , y si su valor es unitario, la expresión resultante indica un comportamiento del módulo de reacción lateral de variación lineal en profundidad caracterizado por la pendiente n_h (figura 2). Aun para coeficientes n fraccionarios comprendidos entre 1 y 0 (límites de validez) el análisis dimensional arroja unidad de longitud (m) para el coeficiente T (relación de rigidez suelo-pilote), lo cual permite obtener una solución cerrada.

4. CONSTRUCCIÓN DE CURVAS p - y CON EXPANSIÓN DE CAVIDADES

El método de cálculo presentado supone que la interfase entre el suelo y el fuste del pilote puede ser representada por resortes discretos cuyo comportamiento es lineal, bilineal o no lineal. Numerosos autores intentan representar el comportamiento de estos resortes mediante funciones parametrizadas con ensayos *in situ*, con laboratorio o con relaciones empíricas (Murchison y O'Neill, 1984). En este

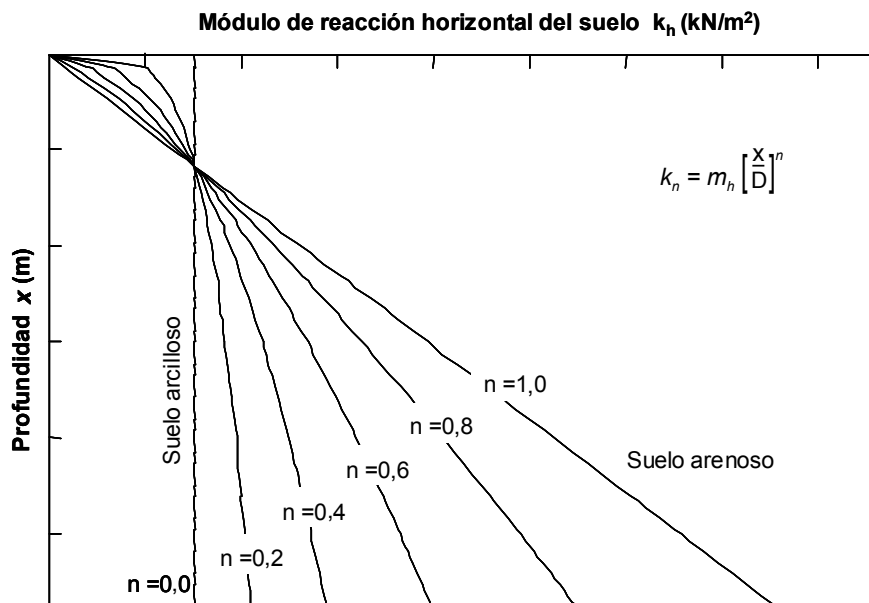


Figura 2. Variación en profundidad del módulo de reacción horizontal k_h

trabajo se presentan los resultados de un dispositivo de laboratorio que permite aplicar acciones laterales al suelo expandiendo una cavidad cilíndrica. Durante el experimento se registran deflexiones horizontales y presiones con lo cual se trazan curvas de presión-expansión siguiendo el procedimiento empleado usualmente con ensayos presiométricos de campo (Arrúa, 2008).

La figura 3 presenta la relación que existe entre el ensayo de expansión y el pilote sometido a carga horizontal. La analogía geométrica se establece entre el radio de la expansión y el radio del pilote (el incremento de deformación radial en el ensayo de laboratorio se propone análogo a la deflexión horizontal en el pilote).

De este modo, para una presión dada en la cavidad, es posible calcular la deformación y de la curva buscada. Se realiza una transformación de la curva de expansión, cuyos ejes corresponden a presión interior de la cavidad y deformación volumétrica unitaria, a la curva p - y , cuyos ejes corresponden a presión y deflexión.

Para establecer la presión de reacción del suelo p se propone el producto entre el diámetro del pilote y la presión desarrollada en el ensayo de expansión ψ , junto a un coeficiente de proporcionalidad λ que

tiene en cuenta la rugosidad del material en contacto con el suelo y el efecto de fricción vertical entre el fuste del pilote y el suelo.

$$p = \lambda \psi D \tag{11}$$

La transformación de curva expansiva a curva p - y requiere la adimensionalización del eje horizontal para establecer la analogía entre las deflexiones y las deformaciones volumétricas unitarias. Esto se realiza mediante el empleo del diámetro D del pilote.

Con la proporción establecida en la figura 3, se obtiene:

$$\frac{y}{D/2} = \frac{u}{r_0} \Rightarrow \frac{y}{D} = \frac{u}{2r_0} \tag{12}$$

Donde y = deflexión horizontal del suelo, $u = \Delta r$ = desplazamiento de la pared de la cavidad durante el ensayo de expansión, r_0 = radio inicial de la perforación cilíndrica de la sonda y D = diámetro del pilote. En el ensayo minipresiométrico se obtienen volúmenes de líquido inyectado, por lo cual es necesario calcular el desplazamiento de la pared de la cavidad para diferentes presiones mediante:

$$u = \sqrt{\frac{v_{iny}}{l\pi} + r_0^2} - r_0 \tag{13}$$

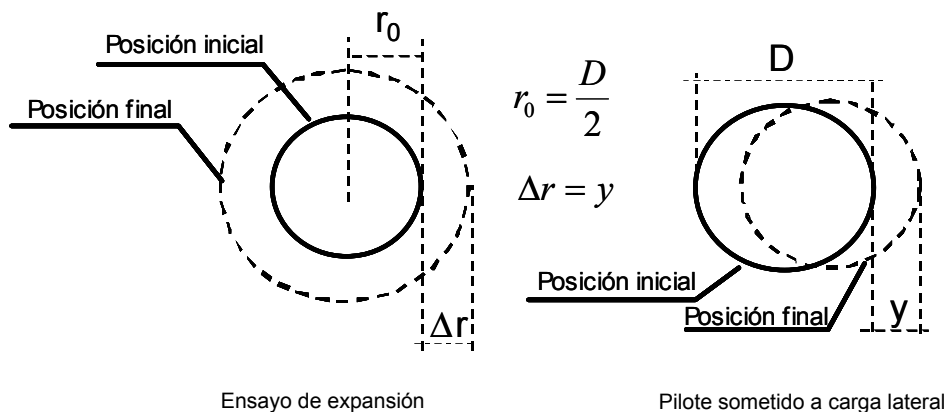


Figura 3. Definición de la deformación y obtenida a partir de los resultados de expansión



Donde v_{iny} = volumen de líquido inyectado para una presión conocida, l =longitud de la celda central de medición de dispositivo de expansión, r_0 = radio de la cavidad. La calibración propuesta se realiza mediante una relación hiperbólica entre la deformación y la presión de reacción del suelo:

$$p = \frac{y/\kappa}{\frac{1}{E_i} + \frac{y/\kappa}{p_{max}^*}} \quad (14)$$

Donde y = deflexión, k = coeficiente adimensional de estructuración del suelo, que varía entre 0,25 y 0,1 para suelos remodelados y estructurados respectivamente (valores obtenidos de los resultados experimentales), E_i = módulo de elasticidad en la solución analítica en medio elástico que calibra la pendiente inicial de ensayo minipresiométrico y p_{max}^* = presión de reacción del suelo máxima obtenida en el ensayo de expansión. La relación entre el módulo inicial de la curva de expansión y el módulo de elasticidad inicial se relaciona (Arrúa, 2008) mediante:

$$E_i = 2(1+\nu) M_{MPi} \quad (15)$$

Donde ν = coeficiente de Poisson y M_{MPi} = módulo inicial de la curva de expansión. Mientras que la presión de reacción máxima del suelo, medida en kN/m, durante la expansión puede obtenerse como:

$$p_{max}^* = p_{max} D 2(1+\nu) \quad (16)$$

Donde p_{max} = presión máxima desarrollada en el ensayo, D = diámetro del pilote para secciones circulares o lado del pilote para secciones rectangulares y ν =coeficiente de Poisson (Arrúa, 2008).

La ecuación propuesta para representar las curvas p - y a partir del ensayo minipresiométrico se obtiene al reemplazar las ecuaciones (15) y (16) en la ecuación (14) con lo cual se obtiene:

$$p = \frac{y/\kappa}{\frac{1}{2(1+\nu)M_{MPi}} + \frac{y/\kappa}{p_{max} D 2(1+\nu)}} \quad (17)$$

El modelo propuesto responde para las curvas p - y a partir de los parámetros obtenidos de un ensayo de expansión de cavidad cilíndrica (módulo inicial y presión máxima). Cuando el contenido de humedad se incrementa, estos parámetros obtenidos de la curva de expansión disminuyen (Schnaid, Kratz de Oliveira y Gehling, 2004).

Los suelos loésicos poseen comportamiento tensodeformacional altamente relacionado con el grado de saturación y, en consecuencia, ésta es una variable que debe ser incluida en la generación de curvas p - y para suelos limosos-arcillosos. La propuesta realizada en este trabajo para tener en cuenta esta variable consiste en realizar ensayos de expansión sobre muestras en condición de humedad natural e inundada.

Como resultado se obtienen dos curvas extremas en las que es posible conocer la magnitud de deformación máxima por humedecimiento de la muestra de suelo. Luego se emplea la ecuación (17) para obtener las curvas analíticas.

En la figura 4 se presentan los resultados obtenidos para una muestra en condiciones de humedad natural ($w=12,7\%$) y próxima a la saturación ($w=40,7\%$) para un pilote de 0,40 m de diámetro y 5 m de longitud. Los parámetros e índices físicos de los suelos limosos loésicos del centro de Argentina han sido reportados por Aiassa (2006). La variación de las curvas p - y para diferentes grados de saturación puede realizarse de manera simplificada aceptando una interpolación lineal entre los módulos de expansión inicial y de la presión máxima obtenidos a partir de las curvas límite presentadas en la figura 4 (humedad natural y saturado). Si se acoge esta condición, se obtiene:

$$M_{MPi} = \frac{(M_{MPi}^{hn} - M_{MPi}^{sat})(Sr - Sr^{sat})}{Sr^{hn} - Sr^{sat}} + M_{MPi}^{sat} \quad (18)$$

$$p_{max} = \frac{(p_{max}^{hn} - p_{max}^{sat})(Sr - Sr^{sat})}{Sr^{hn} - Sr^{sat}} + p_{max}^{sat} \quad (19)$$

Donde Sr = grado de saturación; M_{MPi} = módulo de expansión inicial; p_{max} = presión máxima en

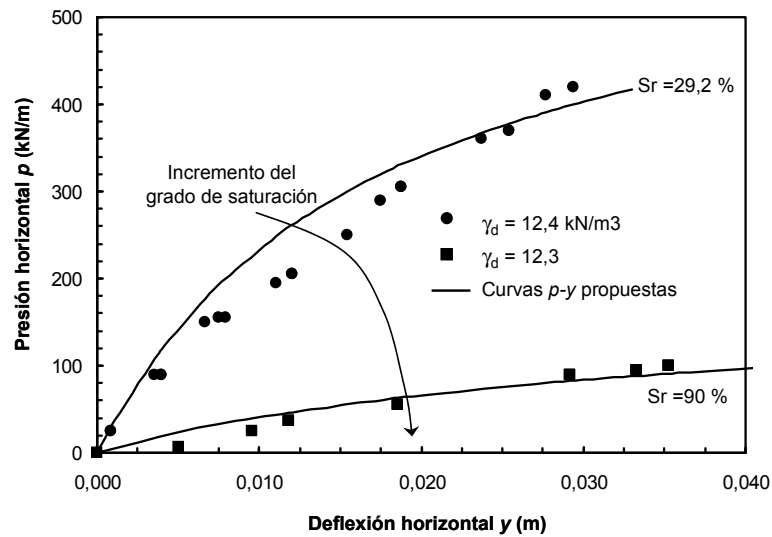


Figura 4. Modelo de curvas p - y en suelos loésicos inalterados comparado con los resultados experimentales para pilotes de 0,4 m de diámetro

expansión; h_n , sat = humedad natural y saturada de las muestras empleadas en el ensayo de expansión.

La figura 5 presenta la respuesta funcional de la ecuación (17) para diferentes contenidos de humedad. Se ha adimensionalizando el eje horizontal respecto al diámetro del pilote ($D = 0,40$ m). Nótese que para presiones de 100 kN/m, las deformaciones

unitarias referidas al diámetro del pilote pueden incrementarse en forma notable. Esto provoca un cambio en las condiciones de sollicitaciones internas en el pilote. Además, el cálculo de pilotes sometidos a sollicitaciones laterales requiere la variación de las curvas p - y con la profundidad. Con esto se pueden obtener las deflexiones y los esfuerzos internos para diferentes profundidades.

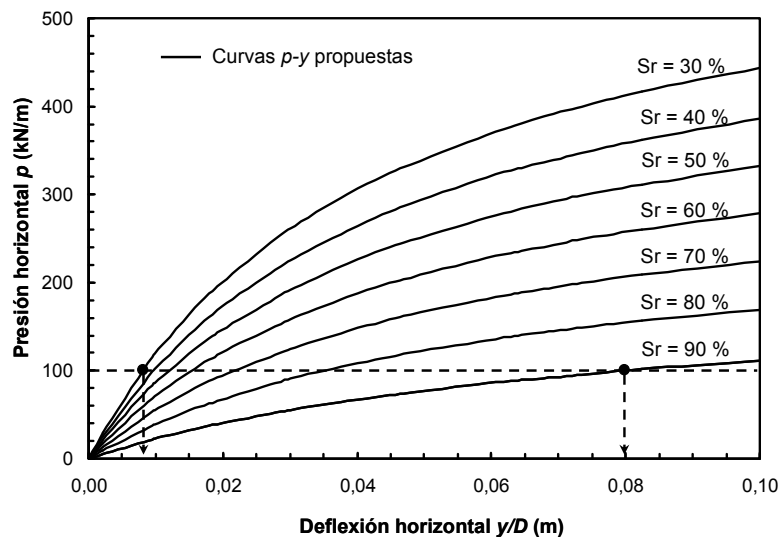


Figura 5. Curvas p - y para diferentes contenidos de humedad



Si se considera que el perfil de suelo posee un valor medio de humedad, se espera que las curvas se rigidicen con el incremento de la presión de tapada. La relación entre la presión del suelo p y la deflexión y debida a la aplicación de una carga externa Q se representa mediante:

$$p = k_h y \quad (20)$$

Si se acepta la relación (7) para la variación del comportamiento de rigidez del suelo en profundidad, se obtiene:

$$m_h = \frac{p}{y} \left(\frac{D}{x} \right)^n \quad (21)$$

Donde m_h = parámetro de crecimiento de la función $k_{h(x)}$, D = diámetro del pilote, n = coeficiente de forma de la curva para distintos tipos de suelos intermedios entre arena y arcilla que adopta el valor de 0,8 para suelos limosos loésicos del centro de Argentina (Arrúa, 2006) y x = profundidad evaluada en el ensayo de expansión. La variable x corresponde a la profundidad de la muestra ensayada en expansión de cavidad cilíndrica x_{conoc} . Sustituyendo la ecuación (17) en (21) se obtiene el coeficiente m_h , que al ser

reemplazado en la ecuación (7) permite establecer el módulo de reacción horizontal en profundidad, con lo cual se obtiene finalmente la presión como función de la profundidad y la deflexión:

$$p = \frac{y}{\left(\frac{\kappa}{2(1+\nu)M_{MPi}} + \frac{y}{p_{\max} D 2(1+\nu)} \right)} \left(\frac{x}{x_{conoc}} \right)^n \quad (22)$$

Debido a que es poco probable que las curvas de presión-deflexión posean endurecimiento indefinido en profundidad (Davisson, 1963), como lo muestra la ecuación (22), se adopta una profundidad crítica (Reese y Welch, 1975) de 10 veces el diámetro, a partir de la cual las curvas p - y se mantienen constantes.

La ecuación (22) posee dos variables independientes que representan el nivel de deflexión y la profundidad, lo cual define una superficie en el espacio euclidiano tal como se presenta en la figura 6. Se muestra que a nivel de superficie ($x = 0$) la presión desarrollada por el suelo es nula (equivalente a la presión desarrollada en suelo granular), pero se

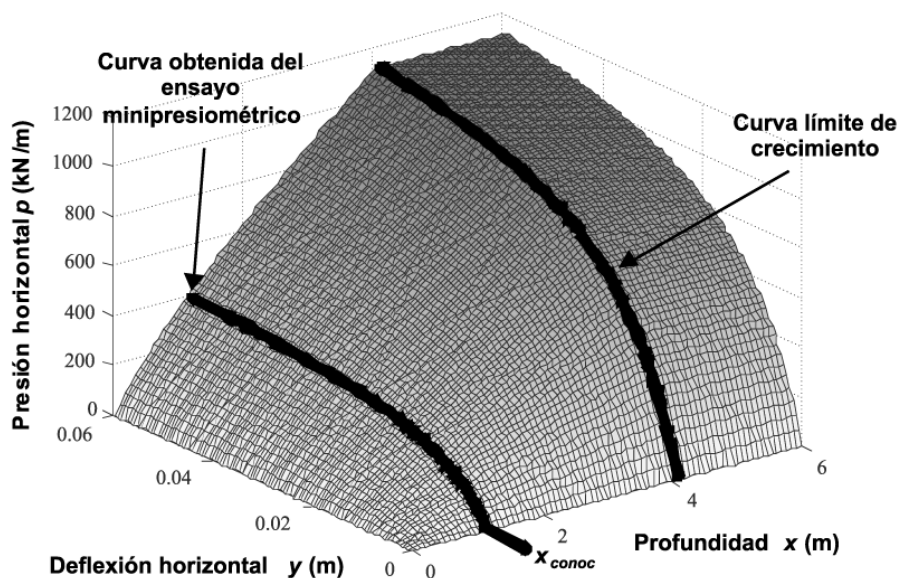


Figura 6. Superficie de presión lateral del suelo en profundidad para suelo limo-arcilloso loésico

incrementa para pequeñas profundidades de manera más suave que en suelos netamente cohesivos. La familia de curvas presentadas en la figura 6 se obtiene a partir de la calibración a los resultados de expansión y la condición de máxima rigidización; estas condiciones se han destacado con líneas continuas.

El procedimiento presentado en esta sección posee la flexibilidad suficiente para abarcar humedecimientos localizados. Su efecto en el comportamiento del pilote puede tenerse en cuenta mediante la modificación de las curvas p - y por medio de la metodología propuesta en este trabajo.

5. CASO DE APLICACIÓN

Las roturas de cañerías de agua potable son frecuentes en las construcciones de la ciudad de Córdoba, Argentina (Rocca y Quintana Crespo, 1997), lo que provoca importantes pérdidas económicas. En consecuencia, se plantea un caso de estudio para evaluar el comportamiento de pilotes ante cargas laterales. El humedecimiento localizado puede provocar una disminución de resistencia en el suelo que rodea el pilote. Esta situación provoca

un incremento en las deflexiones y en los esfuerzos internos del elemento estructural. Se consideran tres instancias de análisis correspondientes a las situaciones 1, 2 y 3. En la situación 1, se supone que el pilote se encuentra en un estrato de suelo en condiciones de humedad natural (instancia inicial en condiciones normales de servicio); en la situación 2 se produce un incremento de humedad del suelo que rodea el pilote, próximo al estado de saturación a 2,0 m de profundidad (rotura de un caño de agua); finalmente, la situación 3 representa una extensión de la zona humedecida desde una profundidad de 1,0 m hasta 3,0 m (aumento del contenido de humedad en el suelo, sin evidencias visibles en la superficie). La figura 7 presenta un esquema del escenario analizado. Se acepta que solo actúa la carga horizontal a nivel de superficie, siendo el momento aplicado y la carga vertical iguales a cero. El modelo de Matlock y Reese se ha modificado con los principios presentados en este trabajo. Su implementación se realizó empleando el código de programación MATLAB 7.0. La discretización de las curvas p - y se ha propuesto con resortes separados una distancia de 0,10 m en toda la longitud del pilote.

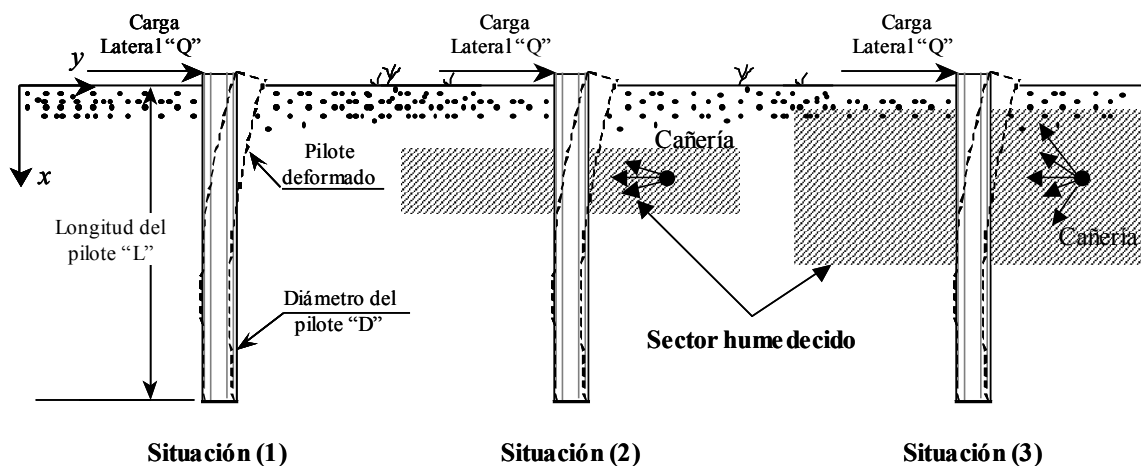


Figura 7. Situación en análisis para establecer el incremento de deflexiones y esfuerzos internos debido a humedecimiento localizado, para un pilote de hormigón armado de 0,40 m de diámetro y 5,0 m de longitud



La figura 8 muestra el perfil de humedad adoptado y cómo se modifican las curvas p - y para cada situación. Es digno de destacar que los incrementos próximos a la saturación del 100 % producen en el suelo curvas de resistencia prácticamente nulas. Esto aproxima al estado barroso que se observa en muestras con estos niveles de humedad.

Las deflexiones calculadas por el modelo para cargas de 150 kN presentan en condición de humedad natural deformaciones de 0,014 m (figura 9). Sin embargo, el humedecimiento localizado provoca un aumento en la deformación del sistema. Cuando se supone humedecido un sector reducido (equivalente al período inicial de humedecimiento por la rotura de la conducción), las deflexiones se incrementan para el mismo nivel de carga hasta 0,017 m. No obstante, si el problema persiste y no es solucionado a tiempo, el humedecimiento se generaliza. Se produce,

en consecuencia, un ablandamiento del material, caracterizado por las curvas p - y presentadas en la figura 8 (situación 3). Esto provoca deflexiones que alcanzan los 0,057 m.

En las situaciones presentadas, a nivel de superficie no es posible reconocer la pérdida de la cañería por incremento de humedad, solo se aprecian modificaciones en el nivel de deformación del pilote, sin causa aparente. Ante el agravamiento del problema, el modelo muestra incremento en los esfuerzos internos del pilote. Los resultados indican que el momento flexor se incrementa hasta un 60 % de la magnitud inicial por el efecto de la saturación de suelo. Los resultados muestran que si se llega a la saturación del estrato en toda la longitud del pilote, la falla puede producirse por rotación global del elemento estructural (equivalente al giro de un pilote corto) pudiendo provocar la falla total del sistema.

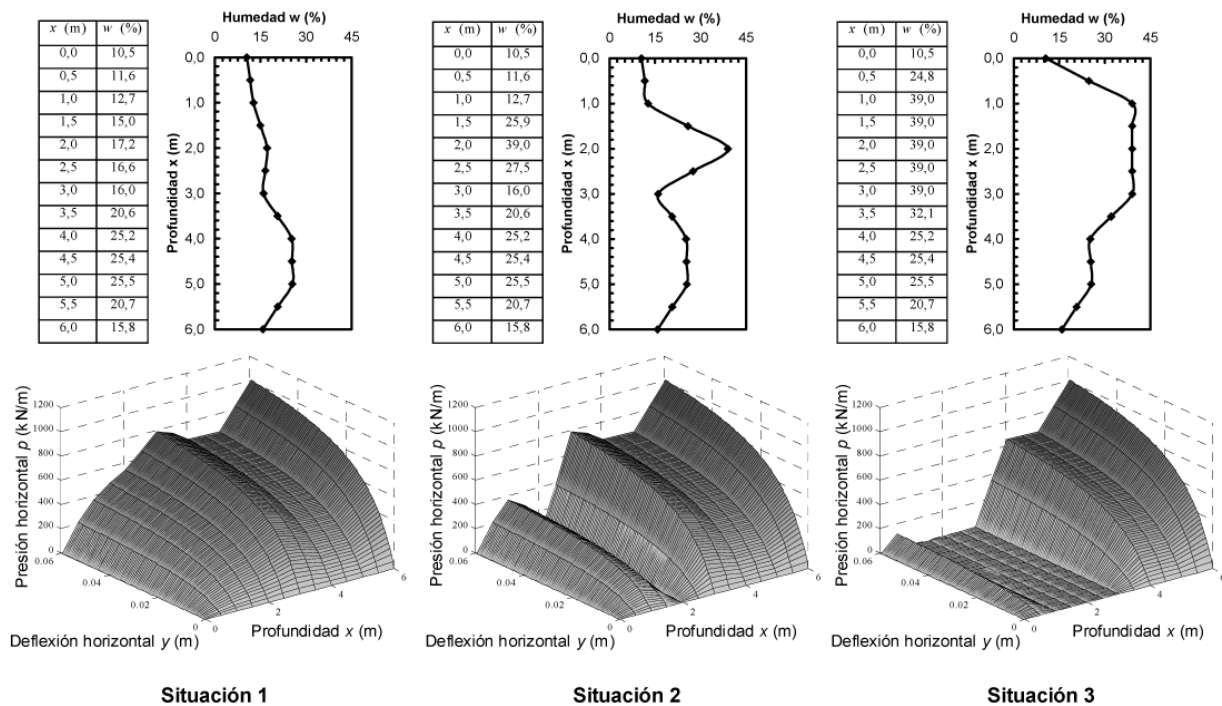


Figura 8. Perfiles de humedad y curvas p - y para las situaciones 1, 2 y 3

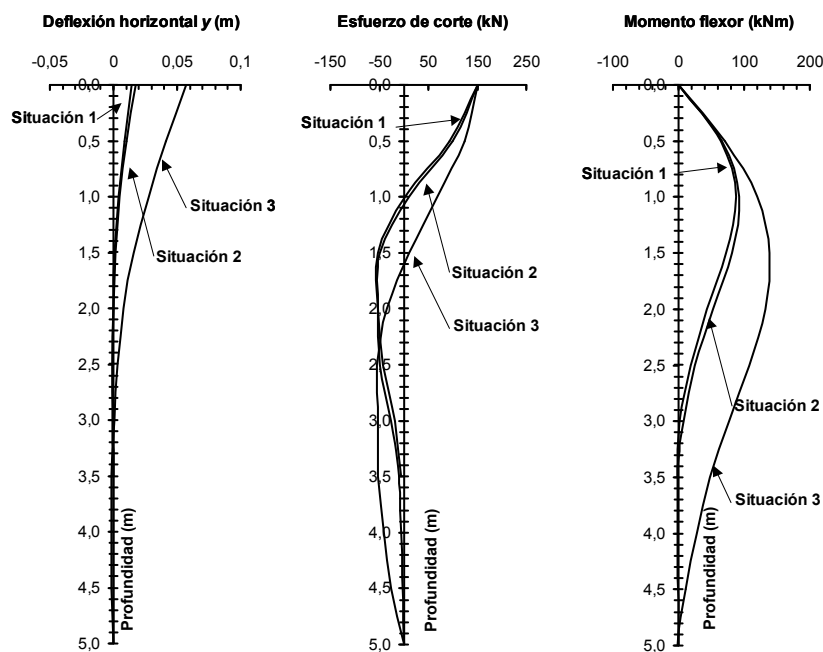


Figura 9. Deflexión, esfuerzo de corte y momento flexor para las situaciones 1, 2 y 3

6. CONCLUSIONES

Los pilotes excavados y diseñados para resistir solicitaciones laterales pueden ser modelados con simplificaciones que llevan el análisis a dos dimensiones. Los métodos basados en curvas p - y , tradicionalmente aceptados, no permiten considerar los pilotes instalados en suelos diferentes de arcillas y arenas, por lo cual se ha propuesto una modificación a estos procedimientos que permite extender los métodos de cálculo existentes al caso de suelos limosos. Se ha desarrollado una analogía geométrica para la obtención de curvas p - y en suelo loésico, a partir de un ensayo de expansión sobre suelo con humedad natural y saturada. Las curvas emplean dos parámetros: 1) el módulo de expansión inicial y 2) la presión máxima desarrollada en el ensayo. Se ha propuesto una alternativa de evaluación de las curvas p - y cuando se modifican la profundidad y el contenido de humedad. Finalmente, se ha analizado un estado de situación modelando el comportamiento de un pilote sometido a humedecimiento localizado por

pérdida de agua en una cañería y humedecimiento progresivo desde la superficie en profundidad.

Los principales hallazgos obtenidos del presente trabajo son:

- El módulo de reacción horizontal sufre importante degradación para niveles de deflexión elevada.
- Las curvas p - y para un perfil de suelo loésico pueden establecerse mediante el empleo del ensayo de expansión. La calibración de modelos hiperbólicos con los parámetros obtenidos del experimento muestran buenos ajustes.
- Las curvas de expansión poseen variaciones con el contenido de humedad, la profundidad y el nivel de estructuración de suelo, lo cual influye directamente en la construcción de las curvas p - y .
- El contenido de humedad afecta el crecimiento de las curvas p - y , en consecuencia, es posible evaluar el comportamiento del pilote en



condición de humedecimiento local o generalizado modificando la superficie de presión-deflexión y presión horizontal desarrollada en el suelo.

- El momento flexor del pilote sometido a carga lateral presentado como situación de estudio en este trabajo puede elevarse hasta un 60 % del nivel de sollicitación inicial por humedecimiento localizado con las condiciones evaluadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, al Ministerio de Ciencia y Tecnología, Gobierno de la Provincia de Córdoba, mediante el Programa de Apoyo a Grupos de Reciente Formación y al Departamento de Ingeniería Civil UTN-FRC. En especial reconocen el apoyo otorgado por la Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

- Arrúa, P. y Aiassa, G. (2008). "Diseño de fundaciones profundas en loess mediante métodos probabilísticos". *Revista Tecnología y Ciencia*, vol. 2, No. 3, pp. 18-33. ISSN 1666-6933.
- Aiassa, G. *Comportamiento de barreras de limo compactado bajo condición de infiltración*. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2006.
- Arrúa, P. *Teoría de probabilidades en el análisis del comportamiento de fundaciones profundas*. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2006.
- Arrúa, P. (2008). Comportamiento tensodeformacional de limos loésicos en dirección horizontal. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Bransby, N. (1999). "Selection of p - y curves for the design of single laterally loaded piles". *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, No. 23, pp. 1909-1926.
- Davisson, M. (1963). *Estimating buckling loads for piles*. Proceedings of the Second Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sao Paulo, vol. I, pp. 351-369.
- Matlock, H. and Reese, L. (1960). "Generalized solutions for laterally loaded piles". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers*. SM 5, pp. 63-91.
- Murchison, J. and O'Neill, M. (1984). *Evaluation of p - y relationships in cohesionless soils. Analysis and design of pile foundation*. American Society of Civil Engineers. J. R. Meyer (ed.), pp. 174-191.
- Prakash, S. and Sharma, H. *Pile foundation in engineering practice*. John Wiley & Sons, New York, 1990.
- Reese, L. and Welch, R. (1975). "Lateral loading of deep foundations in stiff clay". *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 101, No. 7 (July), pp. 633-649.
- Rocca, R. y Quintana Crespo, E. (1997). La gestión de la información geotécnica de la ciudad de Córdoba. GT'97 Congreso Argentino de Ingeniería Geotécnica, Sesión VII: Exploración de Suelos y Zonificación Geotécnica, pp. 1-16.
- Schnaid, F; Kratz de Oliveira, L. A. and Gehling, W. Y. (2004). "Unsaturated constitutive surfaces from pressuremeter tests". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, No. 2 (Feb.), pp. 174-185.
- Shen, W. Y. and Teh, C. I. (2004). "Analysis of laterally loaded piles in soil with stiffness increasing with depth". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, No. 8, pp. 878-882.